

# 「現代の宇宙物理学と常識」

——昭和53年度始業講演（文理学部）\*——

黒 星 瑩 一

## 1. 概 観

今日では、殆んどすべての天体现象は、物理学による研究の対象であると云ってよいが、この様に、天文学が天体物理学として発展するきっかけをなすのは、前世紀の分光学の発達である。それ以前は、星の構造や進化の問題は、まだ真の意味で科学的な研究課題とはなり得なかった。星からの光をプリズムで分けて、輝線や暗線の状態を観測することによって、星の大気がどんな元素から成り立ち、又どんな状態にあるかを知ることができるようになって初めてこれらの問題が研究対象となるわけである。望遠鏡の発達や写真技術の進歩は、次第に空の奥深い所からの情報をより正確にキャッチすることを可能にし、光学天文学の成達は必然的に観測用望遠鏡の巨大化を伴うことになる。この事情は、今日の素粒子物理学の進歩が、ますます巨大化し、高エネルギー化する、加速器を必要とするのと類似している。一方、観測によって集められた情報を理解するための理論の枠組としては、今世紀の革命的な物理理論である量子力学と相対性理論があり、これらの理論は原子核物理学の成立と相俟って、恒星の内部構造や進化の理論を成功に導き、ここに天体物理学の地歩が確立することになる。1945年以後今日にかけては、光学望遠鏡の巨大化のみならず、電波天文学・X線天文学・人工衛星・コンピューター等の発達によって、我々の眼は銀河系を超えて遠くの宇宙空間にまで向けられるようになり、宇宙そのものの構造や進化を問題とする正に宇宙物理学と呼ばれるに相応しい体系が築き上げられるに至ったのである。

## 2. 宇宙への窓

我々は宇宙の様々な情報を、現在主として次の4通りの、それぞれ独立した手段で入手する。

- i) 電磁放射
- ii) 宇宙線
- iii) ニュートリノ
- iv) 重力波

第2次大戦後の電波天文学の時代に入るまでの人類にとっての宇宙とは、専ら光による宇宙像でしかなかった。しかし1960年代からの急速な発展の結果、現在では電磁スペクトルの殆んどすべての波長領域が、観測の対象となっており、それぞれ例えば、電波天文学・赤外線天文学・X線天文学などの分野を構成するに至っている。電磁スペクトルの各領域、すなわち電波・マイクロ波・赤外線・可視光線・紫外線・X線・ガンマ線のそれぞれはその放射の機構が異なるため、宇宙での異った物理過程を我々に見せてくれることになる。電波は電子と電磁場との相互作用に起因し、赤外線は分子レベルでの状態の変化に伴って放射される。可視光からX線までは、原子レベル、即ち電子のエネルギー状態の変化（軌道の間の遷移）に由来し、一番エネルギーの高いガンマ線は、天体現象の種々の局面での核過程、つまり原子核そのもののエネルギー状態の変化が原因で放出される。これらの各波長領域のうち、地球表面で観測できるのは、可視光と、ミリメートルから30メートル位の範囲の電波域のみで、その他の波長域の電磁波は、大気圏での吸収や電離層での反射などによって地表までは届かず、折角何10億光年の彼方から運ばれてきた宇宙の情報が、僅か地球の大気を通過する最後の瞬間に失われてしまうわけである。しかし、仮りに大気がこれらすべての電磁スペクトルに対して透明であったとしたら、一体我々は生存しているであろうか。

ニュートリノは光と同じく静止質量がゼロで、物質と殆んど相互作用をしない素粒子であるため、恒星の中心部から何等妨げられることなく光速度と

同じ速さで宇宙空間に飛び出していく。このニュートリノが星の進化に関して、重要な役割を果たす素粒子であることは大分前から分っていたことであるが、その理由は、正にこの物質との相互作用の極度の弱さにある。つまり星の中心部から、瞬間的にエネルギーと運動量を持ち去っていく。星が内部で生産するエネルギーを、外部に捨てていくメカニズムは、星の進化の時間のスケールやその他の特長を決定する上に重要な決め手となる。ニュートリノはいわば星の内部まで直接に通じている宇宙の窓といえよう。そればかりではない。ニュートリノはまた、宇宙の歴史を記録しているかもしれない。即ち宇宙の始まりと共にできたこの素粒子が、同じく他との作用の弱さのため、現在まで殆んどそのエネルギーを失わないままの形で存在していると考えられるからである。しかしどの様にしてその記録を再生するかはこれからの問題であろう。

重力波は、もし検知できれば、大質量天体の振動やその運動に関する情報を与えてくれることは、理論的に確立しているが、現在まだ十分な確かさをもって検出されたとはいえない。

### 3. 量子論と天体物理学

量子論 (Quantum Theory) は周知の様に、1900年プランク (M. Planck) によって発見され、放射それ自身がある「原子性」を有することが示された。これに端を発し、ド・ブローイ (de Broglie), シュレーディンガー (E. Schrödinger), ディラック (P. A. M. Dirac), ハイゼンベルク (W. Heisenberg) 等の物理学者の手を経て、原子・分子の系を扱う力学体系として完成を見たのが今日の量子力学である。この様に本来量子力学はミクロな対象を記述する理論であるが、天体現象の解明には基本的な役割を果たしている。それは云うまでもなく、星の内部で行われている過程も結局はミクロな原子核や素粒子のレベルの反応の合計であるからである。

星が水素のガスから形成され、内部の温度が1000万度を超えると、中心部で核融合が行われ、 $4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu_e + \text{エネルギー}$  の反応でヘリウムが

できると共にエネルギーが放出される。星が次々に行う核反応の過程の説明は省略するが、これらの反応に正に量子力学的効果が顕われているのである。即ち、2つの原子核同志（ともに正電荷をもつ）がある距離以内に接近すると、当然クーロンの斥力が強くなる。従って両者が結合するためには、このクーロンの壁（Coulomb barrier）を越えなければならないが、古典物理学によれば、自身のエネルギーよりも高いエネルギーの壁を通過することは許されない。しかし量子力学によると、粒子がその全エネルギーよりも高いエネルギーの壁を透過する確率が、ゼロとは異なるある値をもつのである。これをトンネル効果と云う。このクーロンの壁を通過の暁には、両原子核の間に反応の行われる確率が存在して、この反応の確率は、もはや粒子の速度やエネルギーには無関係で、ただ原子核の種類によってのみ決ってくる。天体の現象に関係する今一つの重要な量子力学の原理は、パウリ（W. Pauli）の排他原理である。パウリは1926年、電子のスピン概念を導入すると共に、スピンの状態（2価性の自由度）も含む一つの量子力学的な状態には、1個の電子しか入れないという原理を発表した。これは、原子内の電子がすべて一番エネルギーの低い、一番内側の軌道に集ってしまわないことを説明するためのもので、実際電子が各軌道に分れて存在していることは、原子の出すスペクトルの規則性から明らかである。個々の電子がこの様な排他原理に従うとき、それら電子の集団を記述する統計を、フェルミ・ディラック（Fermi-Dirac）統計と云う。この理論によると、電子はエネルギーの低い状態から1個ずつ順次つまっていくので（ただし、電子集団は空間の比較的限られた領域にとじこめられているとする）、かなりエネルギーの高い状態も電子によって占められていることになる。この最も高い（電子により占められた）エネルギーの値を縮退エネルギーとよぶ。

白色矮星を説明するのは正にこの電子の縮退エネルギーである。白色矮星は星の進化の終着駅の一つで、中心部での核燃焼は終っており、その大質量を支えるのは熱的圧力ではあり得ない。非熱的圧力として登場するのが電子の縮退圧に他ならない。即ち温度がゼロであっても、電子集団の縮退エネ

ギーは場合によっては熱によるエネルギーよりも高くなり、これによる電子の激しい運動から生ずる圧力で巨大な質量が支えられているのである。この縮退圧を用いての星の説明は、後に中性子星の話の所にも登場する。

#### 4. 相対論と天体物理学

量子論と共に重要な物理理論は、云うまでもなく相対性理論 (Theory of Relativity) である。アインシュタイン (A. Einstein) による1905年の特殊相対性理論及び1916年の一般相対性理論は、時間・空間についての我々の常識的な考え方に根本的な改訂を迫った。即ち時間も空間も絶対の座からひき下ろされ、様々の物理過程を演ずる物質の存在に無関係に存在する時間・空間を考えることの無意味なことが示されたのである。又、時間・空間を同等に扱う4次元世界の考えも導入された。

このうち特殊相対論は慣性系相互の関係を扱い、ある出来事と他の出来事が同時に起ったという様な表現は、観測者の拠る座標系を指定して初めて意味をもつことを教えた。即ち同時性という概念の相対性である。従って、当然時間の長さや、空間的長さも相対的概念でしかなくなる。この様な効果は、光速度に迫る素粒子の振舞いなどの観測を通じて、実験的にも検証されていることである。又理論面では、特殊相対論と量子論とから相対論的場の量子論が建設され、今日の素粒子論の基本的枠組となっている。

一方、一般相対性理論の方は、古今の物理理論のうちで最も美しい理論と云われてはいるものの、その予言する効果が、太陽系の弱い重力場では顕著でないため、いわゆる古典的な三つの検証（水星の近日点移動、太陽附近での光線の弯曲、重力場による赤方偏移）を除くと、発表後50年近くの間は、ごく一部の学者の研究対象であつたに過ぎない。しかし1960年代になって、クエーサー (Quasar)、パルサー (Pulsar) 及びX線天体などの発見が始まると、一般相対論は次第に最もアクティブな研究分野へと登場してくることになった。一般相対性理論は、重力現象を時空の曲率として捉える。即ち、重力源（物質）があると、その周囲の時間空間が平らではなくなって、ある

曲率をもってくる。そして、この重力場の中で運動する第2の物体の運動は、曲った時空での自由運動と考えればよいことになる。自由運動の辿る道筋を測地線とよぶ。時空の曲り具合は重力源の強さに関係し、この両者の関係を表わしたものがアインシュタインの重力場の方程式に他ならない。相対論的重力理論が主役を演ずる天体現象を考える前に、自然界に存在する力を分類してみると、次の4種類となる。

- |             |                 |
|-------------|-----------------|
| i) 強い相互作用   | 1               |
| ii) 電磁相互作用  | $\sim 10^{-2}$  |
| iii) 弱い相互作用 | $\sim 10^{-5}$  |
| iv) 重力      | $\sim 10^{-39}$ |

数字は、強い相互作用を1としたときの他の作用の強さのオーダーである。これによって、重力の強さが他の力に比べて如何に小さいかが知れる。従って、実験室での実験などでは、2つの物体間に働く万有引力などは無視することができるわけである。ここで強い相互作用と云うのは、原子核内で働いている力であり、又弱い相互作用は、原子核のベータ崩壊などに関与する力のことである。それでは重力が基本的な役割を果す様な場はあるのであろうか。それが宇宙である。星とか銀河の様な巨大な質量の系では、重力が一番強い作用を及ぼすことになる。そのわけは、強い相互作用も弱い相互作用も、その力の及ぶ範囲が $10^{-13}$  cm 又はそれ以下であるのに反して、重力や電磁気力の作用の到達距離は無限大であるため、系が大であればある程重力による結合力は強くなるのである。電磁力には引力と斥力があるので、巨大な物質系では互いに相殺して重力だけが残ることになる。結局、強い相互作用の様にその到達距離が、考える系のスケールに較べて余りにも小さい力は、その系には効いてこないわけである。太陽系などでの重力は弱い重力場であって、実際ニュートンの重力理論は太陽系での観測から導かれた。それでは強い重力場とはどのような場合のことであらうか。それは星の重力エネルギーと、その星の全質量エネルギーとが同程度になる場合に実現される。いま星の質量を $M$ 、半径を $R$ とすれば、このことは次の様に書ける。

$$GM^2/R \sim MC^2$$

これが成り立つのは、 $M$ を一定にしたまま $R$ を小さくした場合で、高密度天体がこれに当る。即ちこの様な強い重力の場では、一般相対論的効果が顕著になり、時空の曲率は非常に大きな値となるため、そこを進む光の道筋も遂には自分自身で閉じた“曲線”となってしまう。又、その附近での赤方偏移も無限大に近づき、時間の進み具合も殆んどゼロとなってしまう。

アインシュタインの一般相対論発表の直後、その方程式を、シュワルツシルト (K. Schwarzschild) が簡単な特別な場合について解いて、今日シュワルツシルトの解とよばれている解を得たが、その解の表わす時空には、 $2GM/C^2 (=r_s)$  ( $M$ : 物体の質量,  $G$ : 重力定数,  $C$ : 光速) という特長的な長さの次元をもつ量が含まれていて、大変面白い性質を示す。即ち、 $r_s$ を半径とする球面は、その内側からは光でさえもその外側に出ることはできず、外側から内側に入った物も再び外へは出られないという性質をもっていて、その内側の情報は全く我々にとって知るよしもないのである。この球面は「事象の地平線」(Event horizon)とよばれ、その内側の領域がいわゆるブラックホール (Black hole) である。この  $r_s$  は、先程のエネルギーの考えから求められる星の半径 $R$ と同じオーダーであることを注意しておく。星が主系列星として誕生して、その質量に応じて様々の経路を辿りながら、遂に進化の果てに到着する形態には、よく知られている様に、白色矮星・中性子星・ブラックホールの3つの場合がある。白色矮星や中性子星にはそれぞれ臨界質量があって、たとえば、白色矮星が前述の電子の縮退圧によって安定に存在するためには、その質量が $1.4M_\odot$  ( $M_\odot$ は太陽質量;  $2 \times 10^{33}g$ ) 以下でなければならないことが分っている。多くの星はその進化の過程で、余分の質量を新星や超新星の形でふき飛ばして、この臨界質量以下に身を整理して白色矮星として一生を終るものと考えられ、事実1960年代半ば頃までは、ブラックホールなど真剣に考える人は殆んどなかったと云ってよい。しかし1960年代の終りに、電波天文学による大きな発見があり、人々が真剣に白色矮星以外の可能性も考える様になるきっかけとなった。それがパルサーの発

見である。間もなくこれが回転する中性子星であると同定され、理論的には1934年頃より示唆されていた中性子星が遂に発見されたのである。中性子星は、自分自身の重力を、中性子の縮退圧（中性子も Pauli の原理に従う）で支えている星である。この結果、70年代に入って、天体物理学者は、これまで人間の考えた最も奇怪な物体である、ブラックホールの可能性を真面目に取り上げ始めることになる。コンピュータの発達が大きく貢献していることも事実で、これによって星の進化の諸過程を様々のモデルによって描き出すことが可能となった。さて、星が核燃料を使い果した結果、その中心部に  $2.5M_{\odot}$  位以上の物質を含んでいると、いかなる物理学で知られた力によっても、もはや星を支えることが出来ないことが示される。その場合、星は自身の重力でどこまでも収縮を続けていく以外になく、いわゆる重力崩壊 (Gravitational Collapse) をひき起すわけである。このような状態の作り出す重力場は、正に一般相対論の活躍舞台に他ならない。

ブラックホールは、我々が観測によってそれ自身を“見る”ことは出来ないわけであるが、他のノーマルな星と近接連星系をなしている場合に、その星から流れこむガスが原因となって放射される、X線を観測することによって、“観測”することが可能である。この様にして、現在、有名な白鳥座の X-1 天体 (Cyg. X-1) がかなりの信頼度でブラックホールであるとされており、又最近、ヴィルゴ (乙女座) の銀河星雲、M-87 の中心部にそれらしき物を発見したという話もある (未確認)。ともかく、もしブラックホールが存在すると、その附近での天体物理学的な過程に及ぼす影響には、常識的に考えられる物以外にも様々の内容の物があって、興味の尽きない所である。我々手持ちの、太陽系附近で得られた物理学にも歪みが生ずるかもしれないし、太陽系という静かな平和な局所宇宙が、むしろアブノーマルで、激しい天体活動や強い重力場での諸現象が見られる宇宙の部分の方が、却ってノーマルなのかもしれない。つまりそこでは、我々の云う常識と非常識とが逆転することになる。

強い重力場が関係している他の天体としては、クエーサーもある。これは



光学的には星の様に見える天体であるが、そのスペクトルが示す赤方偏移の大きさは異常で、この原因が i) 重力場による、ii) ドップラー効果による、iii) 宇宙論的理由による、の何れであるか結着はついていないが、iii) を支持する研究者は多い。ただ宇宙膨張によるとすると、それは赤方偏移の大きさから、何10億光年の彼方ということになって、それを光らせている反応が分らなくなる。或いはその原因に、iv) 未知の物理法則による、を付け加えなければならないかもしれない。

## 5. 宇宙の姿

アインシュタイン自身、自分の打ち立てた相対論を宇宙に適用したが、その時は宇宙は時間的に静的 (static) であるとした。数年後、フリートマン (Friedmann) により非定常宇宙の解が見出されて以来今日まで、多くの宇宙モデルが考案された。今日ほぼ確立している宇宙像は、云うまでもなく膨張する宇宙で、約150億年前に大爆発から始まったとするものである (Big Bang 宇宙)。観測的には、よく知られたハッブルの法則 (E. Hubble) (1929) が根拠となって唱えられた。即ち、宇宙の後退速度は、その星雲までの距離に比例するというもので、 $v=Hr$  と表わされ、 $H$  を Hubble 定数とよぶ。 $H$  は今でも色々な方法で測定されているが、およそ  $H=55 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  という値をもつ。

膨張宇宙像はまた昔からよく知られた、オルバース (Olbers) のパラドックスを解決する上でも成功している。このパラドックスの内容は、夜は何故暗いかということである。宇宙は大きさが無限でかつ無限の過去から存在したとし、同じ明るさの星が一様にユークリッド的な空間に分布しているとすれば、我々を中心に半径  $r$  の球面の所の星の個数は  $r^2$  に比例し、又一个の星から我々に達する光の量は  $r^2$  に反比例するので、結局全宇宙から送られてくる光の量は無限大となってしまう。何等かの理由で遠方からの光の量が少なくなればよいのであるが、それには宇宙がハッブルの法則に従って膨張していればよい。即ち、ある距離の所の膨張速度は光速に達していて、そ

れ以遠の宇宙の奥からは、何も情報が届かなくなるからである。

このパラドックスは、熱力学的観点からは次の様にも表現できる。宇宙がもし無限の過去から存在したとすれば、これまでに宇宙は何故熱的平衡に達していないかという問題である。現実の宇宙空間は大変低温であり、一方星は大変高温の存在である。一定不変の宇宙が、常に熱的不平衡のままの状態にどの様にして存続し得るのであろうか。星はこの場合高熱源で、他の宇宙領域は熱の吸いこみ口、低熱源となる。そして長い間には、すべての領域が均一の温度になり、平衡状態に達する筈である。この見方に対して、膨張宇宙においては、熱の吸収領域が絶えず広がっていくことで、熱的平衡状態に達しないことが理解できるのである。

宇宙膨張が、100億年以上の昔に起った大爆発から始まったことが直接的に確かめられたのは、ペンジアス (Penzias), ウィルソン (Wilson) による宇宙背景放射の発見である (1965)。絶対温度2.7度の等方的に宇宙からやってくる電波は、宇宙がその昔、超高温の火の玉であったことを証明する。この時点で、もう一つの対称的な宇宙論である、ボンディ (Bondi) 達による定常宇宙論は、まず色彩を失ったと考えてよいであろう。しかしこれもある意味では、捨て難い魅力をもつ宇宙論であるといえる。

もう一つの、変った宇宙論を述べよう。今、電子と陽子の間に働く静電気力と重力とを比較してみよう。 $F_E = e^2/r^2$ ,  $F_G = GmM/r^2$  ( $m$ ,  $M$  は電子・陽子の質量) であるから、 $F_E/F_G \cong 10^{40}$  となる。一方、Big Bang 以来の宇宙の年令は、 $10^{17}$  秒で、これを電子半径を光が通過するに要する時間、 $10^{-13}$  cm/ $3 \times 10^{10}$  cm  $\cdot$  sec $^{-1}$  で割ってみると、 $10^{40}$  となる。この2つの $10^{40}$  という数字の一致は単なる偶然であろうか。Diracはこのことを次の様に考えた。次の式、

$$\frac{F_E}{F_G} = \frac{e^2}{GMm} = 10^{40} = \frac{\text{宇宙年令}}{\text{電子半径の光の通過時間}}$$

から明らかな様に、この一致が偶然でないとすると、(原子に関する量は一定として) 重力定数 $G$ の値が宇宙の進化と共に小さくなっていく筈である

と。この、定数 $G$ の値の減少説は、他の研究者、例えば Hoyle など別の角度から唱えているのである。

## 6. 結 び

今日の宇宙物理学を、我々が現在達している物理理論の観点から大まかに眺めてきた。我々の物理学というものは、太陽系の中で、又そのスケールに対してできたものである。そして今やこの武器を全宇宙に対して使おうとしている。既にこの物理学の教える所にさえ、日常の経験とはかなりかけ離れた内容のものが含まれており、教室の中と外とで頭を切り換える必要がありそうである。ましてや宇宙を考えると、超常識的な状態や物質の存在は、覚悟せねばならない。そもそも物理学というものは、日常経験ではめったにお目にかからない様な状況の理解の仕方を教えてくれるものなのである。常識はこれに対して、平生の経験の積み重ねから抽出した智慧であるから、これを振り回して宇宙を理解しようとしたり、常識と合わないからばかばかしいと決めつけるのは、正しい方法とは云えないであろう。新しい現象に遭遇したとき、常識にあくまで固執するくせのある人は、むしろ常識豊かなことが仇になるかもしれない。もし人間が電波を“見る”ことができたらどんな空であろうか、恐らく夜も昼も区別はないであろう、美しい青空ということもないであろう。又もし定数 $G$ の値が短時間の間に変化したらどんなことになるであろう、 $G$ の値が正にこの値であるからこそ人間が存在するのかもしれない。この様な夢の様な話、これは常識の範囲で考えられることである。

\* これは始業講演の内容に少し加筆したものである。